

SINTESA BIODIESEL DARI MIKROALGA *CHLORELLA VULGARIS* MELALUI REAKSI TRANSESTERIFIKASI IN SITU

Edy Purwanto^{1*)}, Yunus Fransiscus^{1,2)}, Ivan Soebroto¹⁾, dan Vina Indrawati¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Surabaya

²⁾Pusat Studi Lingkungan, Universitas Surabaya

Jl. Raya Kalirungkut 60293 Surabaya

Telepon (031)2981158, Faks. (031) 2981178

Email: edypurwanto@ubaya.ac.id

Abstrak

Mikroalga *Chlorella vulgaris* memiliki kandungan minyak yang sangat tinggi mencapai 58% sehingga bisa digunakan sebagai bahan baku sintesa biodiesel. Biodiesel dapat dihasilkan dari mikroalga melalui reaksi transesterifikasi in situ yaitu proses ekstraksi dan transesterifikasi di dalam satu tahapan proses. Biomassa kering mikroalga diperoleh dari hasil kultivasi selama 7 hari menggunakan media yang mengandung nutrisi untuk kemudian dipisahkan dan dikeringkan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel. Reaksi transesterifikasi dilakukan di dalam reaktor gelas dilengkapi dengan pemanas, kondensor refluks, pengaduk, dan termokopel. Percobaan dilakukan dengan mereaksikan biomassa kering mikroalga *Chlorella vulgaris* dan metanol dengan bantuan katalis asam sulfat. Reaksi dilakukan pada suhu reaksi, konsentrasi katalis tertentu dan sample diambil setiap 1,5 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biodiesel dapat disintesa dari mikroalga *Chlorella vulgaris* menghasilkan metil heptadekanat dan linoleat. Semakin tinggi suhu reaksi menurunkan yield metil ester. Yield metil ester meningkat dengan bertambahnya konsentrasi katalis pada suhu reaksi 40 °C dan 50 °C. Pada suhu reaksi transesterifikasi 60 °C tidak menunjukkan perbedaan hasil yield yang signifikan pada konsentrasi katalis 1% dan 2% berat. Kondisi optimum pada reaksi transesterifikasi in situ adalah suhu reaksi 40 °C, konsentrasi katalis asam sebesar 2% dan waktu reaksi 1,5 jam menghasilkan yield metil ester sebesar 47%.

Kata kunci: *Chlorella vulgaris*, biodiesel, transesterifikasi in situ, yield

THE SYNTHESIS OF BIODIESEL FROM MICROALGAE *CHLORELLA VULGARIS* THROUGH IN SITU TRANSESTERIFICATION

Abstract

Chlorella vulgaris has high oil content account for about 58% therefore it could be used as a raw material for biodiesel synthesis. Biodiesel produced through in situ transesterification in which extraction and transesterification in a single step. Dry biomass of microalgae produced from cultivation about 7 days using medium rich in nutrients then separated from medium dried for biodiesel synthesis. Transesterification reaction was conducted in a glass reactor equipped with heater, reflux condenser, stirrer, and thermocouple. Experiment was run using dry biomass of microalgae and methanol with the utilization of sulfuric acid as catalyst at several isothermal conditions, certain catalyst concentration, and samples were taken every 1.5 hours. The results show that biodiesel could be synthesized from *Chlorella vulgaris* produced methyl heptadecanoate and linoleate. Higher reaction temperature results in lower yield of methyl ester. Catalyst concentration has positive effect to yield as yield of methyl ester increases with the raise of catalyst concentration at 40 °C dan 50 °C. There was no significant effect of catalyst concentration if reaction was run at 60 °C. The optimal operating condition for in situ transesterification achieved at reaction temperature of 40 °C, 2% acid catalyst concentration and 1.5 hours reaction time produced biodiesel with 47% yield of methyl ester.

Key words: *Chlorella vulgaris*, biodiesel, in situ transesterifikasi, yield

PENDAHULUAN

Energi merupakan kebutuhan vital manusia untuk bisa melakukan aktifitas sehari-hari. Dunia pada masa sekarang mengalami krisis energi disebabkan karena semakin meningkatnya kebutuhan manusia akan bahan bakar dan di sisi lain sumber bahan bakar fosil semakin berkurang karena sifatnya yang tak terbarukan. Penggunaan bahan bakar fosil secara terus menerus tidak akan berlanjut karena keberadaannya yang terbatas dan bahan bakar fosil turut berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan karena proses pembakaran menghasilkan gas CO₂ yang menyebabkan gas efek rumah kaca (Khan et al., 2009).

Gas rumah kaca merupakan hasil akumulasi secara terus menerus dari hasil pembakaran bahan bakar fosil karena aktifitas manusia untuk kebutuhan pemanasan, transportasi dan industrialisasi (Chiu et al., 2009). Selain itu peningkatan konsentrasi gas rumah kaca telah menyebabkan global warming secara serius yaitu peningkatan suhu di permukaan bumi dan lautan. Hal ini bisa berakibat buruk terhadap kelangsungan habitat yang ada di permukaan bumi karena akan ada serang-kaian efek buruk setelah pemanasan global yaitu udara permukaan bumi semakin panas, wabah penyakit, es di kutub yang meleleh sehingga meningkatkan ketinggian air laut, berkurangnya jumlah daratan dan lain-lain. Berbagai macam usaha telah dilakukan untuk mengurangi kadar gas rumah kaca di udara dengan menggunakan perlakuan fisik dan kimia untuk mengurangi kadar gas CO₂ di udara. Selain itu pendekatan secara biologi perlu dilakukan dengan menggunakan teknologi mikroalga karena mikroalga memiliki efisiensi fotosintesis yang lebih bagus daripada tanaman biasa dan mikroalga adalah merupakan kandidat yang bagus untuk mengikat gas CO₂ di udara (Chiu et al., 2009).

Mikroalga merupakan sumber bahan alam yang sangat potensial untuk dikembangkan sebagai sumber bahan bakar biodiesel pengganti solar karena kandungan minyak yang cukup tinggi di dalam biomasanya (Khan et al., 2009). Penggunaan mikroalga sebagai sumber bahan bakar perlu mendapat perhatian serius sebagai sumber bahan bakar alternatif biodiesel yang terbarukan karena keuntungan lain yang diperoleh yaitu mengurangi dampak pemanasan global akibat proses pembakaran bahan bakar fosil. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa mikroalga sangat menjanjikan sebagai sumber bahan baku biodiesel yang terbarukan karena bisa memenuhi permintaan untuk bahan bakar transportasi secara global. Penggunaan mikroalga untuk produksi biodiesel tidak akan mengambil bagian minyak nabati untuk bahan pangan yang diperoleh dari pertanian. Produktifitas minyak dari mikroalga jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan minyak kelapa sawit untuk luas lahan yang sama yaitu bisa mencapai 20 kali lipat (Khan et al., 2009).

Pada sintesa biodiesel dari mikroalga *Chlorella vulgaris* terdapat dua tahapan penting yaitu kultivasi mikroalga untuk mendapatkan biomassa dengan kadar minyak tertentu dan sintesa biodiesel dari mikroalga melalui reaksi transesterifikasi in situ menghasilkan biodiesel/metil ester. *Chlorella vulgaris* merupakan mikroalga yang sangat potensial untuk dikembangkan

sebagai bahan baku sintesa biodiesel karena memiliki kandungan minyak yang tinggi bisa mencapai sebesar 58% (Mata et al., 2010).

Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari sintesa biodiesel dari mikroalga *Chlorella vulgaris* melalui reaksi transesterifikasi in situ dan mendapatkan kondisi operasi reaksi transesterifikasi yang optimum pada pembentukan biodiesel/metil ester. Pada penelitian difokuskan pada pengaruh suhu reaksi dan konsentrasi katalis H₂SO₄. Suhu reaksi berpengaruh terhadap laju reaksi reaksi dan konsentrasi katalis berpengaruh terhadap peningkatan laju reaksi transesterifikasi in situ.

Penelitian tentang mikroalga perlu terus dikembangkan di tengah krisis dunia akan energi serta pemanasan global. Biomassa mikroalga mengandung minyak dalam jumlah tertentu yang apabila diproduksi secara besar-besaran dapat digunakan bahan baku untuk pembuatan biodiesel, bahan bakar alternatif pengganti solar. Produktifitas minyak dari mikroalga adalah lebih tinggi bila dibandingkan dengan minyak nabati dari biji-bijian sehingga perlu untuk dikembangkan. Sehingga bahan baku untuk produksi biodiesel pengganti solar akan melimpah dan permasalahan dunia akan krisis energi bisa terselesaikan.

Permasalahan efek rumah kaca bisa dipecahkan dengan aplikasi teknologi mikroalga yaitu dipasang secara terintegrasi dengan unit gas buangan hasil pembakaran yang ada di industri. Di dalam metabolisme mikroalga, gas buang CO₂ melewati proses fotosintesis akan diubah menjadi gas O₂ sehingga gas efek rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global bisa dikurangi. Sehingga mikroalga merupakan penyumbang gas O₂ yang cukup besar di udara. Hasil dari metabolisme mikroalga juga akan menghasilkan minyak yang bisa digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel untuk bahan bakar industri. Sehingga dari gambaran tersebut penelitian tentang mikroalga untuk mitigasi gas efek rumah kaca dan produksi bahan bakar alternatif biodiesel memberikan manfaat dan peluang yang besar bagi masyarakat.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada percobaan adalah mikroalga *Chlorella vulgaris*; media Basal dengan komposisi KNO₃ (1,25 g/L), KH₂PO₄ (1,25 g/L), MgSO₄·7H₂O (1 g/L), CaCl₂ (0,0835 g/L), H₃BO₃ (0,1142 g/L), FeSO₄·7H₂O (0,0498 g/L), ZnSO₄·7H₂O (0,0882 g/L), MnCl₂·4H₂O (0,0144 g/L), MoO₃ (0,0071 g/L), CuSO₄·5H₂O (0,0157 g/L), Co(NO₃)₂·6H₂O (0,0049 g/L), dan Na₂EDTA (0,5 g/L); metanol (99,9%) dan H₂SO₄ (98%) diperoleh dari Merek.

Kurva Pertumbuhan Mikroalga

Kurva pertumbuhan mikroalga berguna untuk mengetahui fase-fase pertumbuhan mikroalga. Mikroalga *Chlorella vulgaris* yang diinokulasi sebanyak 50 ml dipersiapkan sebagai starter. Media Basal yang telah dipersiapkan dimasukkan ke dalam *autoclave* pada 121°C selama 30 menit untuk sterilisasi. Mikroalga diinokulasi di dalam reaktor bervolume 500 ml dengan penambahan CO₂ dari udara yang disuplai oleh aerator. Sampel mikroalga diambil setiap 12 jam dan diukur berat

biomassa keringnya dengan metode gravimetri. Pengambilan sampel dilakukan sampai diperoleh kurva pertumbuhan mikroalga mulai fase lag sampai fase stasioner.

Kultivasi dan Pemanenan Mikroalga

Mikroalga sebanyak 50 ml diinokulasikan ke dalam media Basal di dalam labu erlenmeyer 500 ml dengan penambahan udara melalui aerator pada intensitas cahaya tertentu. Mikroalga yang sudah berumur 7 hari diambil kemudian dilakukan proses sentrifugasi untuk memisahkan biomassa mikroalga dari media dan memasukkan ke dalam aluminium dish. Biomassa mikroalga dikeringkan di dalam oven pada suhu 40 °C selama 12 jam dan massa biomassa kering ditimbang untuk digunakan sebagai bahan baku pembuatan biodiesel

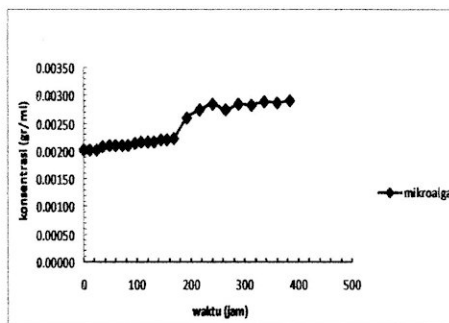
Sintesa Biodiesel

Metode sintesa biodiesel menggunakan reaksi transesterifikasi in situ diadaptasi dengan modifikasi penelitian yang dilakukan oleh Qian et al. (2008) dan Ehimen et al. (2010). Reaksi transesterifikasi in situ pada sintesa biodiesel dilakukan menggunakan reaktor gelas yang dilengkapi dengan pemanas, kondensor refluks, pengaduk, dan termokopel. Biomassa kering mikroalga sebanyak 0,5 gram dimasukkan ke dalam reaktor. Kemudian 80 ml metanol dan katalis asam sulfat sesuai dengan variabel percobaan dimasukkan ke dalam reaktor. Reaksi transesterifikasi in situ dilakukan selama 6 jam pada berbagai kondisi isothermal (40, 50, dan 60 °C) dan beberapa konsentrasi katalis H_2SO_4 (1% dan 2% berat campuran). Sampel diambil setiap 1,5 jam untuk dianalisa komposisi dan konsentrasi metil ester menggunakan gas kromatografi (Baber et al., 2005). Produk reaksi disaring untuk memisahkan sisa biomassa dan cairan yang dianalisa kadar metil esternya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva Pertumbuhan Mikroalga

Kurva pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* sampai pada fase stasioner terlihat pada Gambar 1. Tahapan pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* sesuai dengan Gambar 1 sampai fase stasioner terdiri atas fase lag, fase eksponensial, dan fase stasioner.

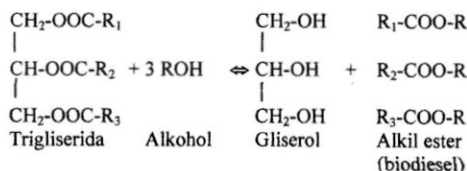


Gambar 1. Kurva pertumbuhan mikroalga *Chlorella Vulgaris*

Fase lag dicapai pada waktu pertumbuhan 36 jam sampai dengan 192 jam, pada fase ini beberapa sel belum tumbuh dengan sempurna karena masih berada dalam kondisi adaptasi dengan media. Oleh karena itu, konsentrasi yang diperoleh masih belum memiliki kecenderungan untuk naik secara eksponensial. Setelah waktu pertumbuhan 192 jam pertumbuhan mikroorganisme cenderung meningkat tajam, hal inilah yang kemudian disebut sebagai fase eksponensial. Pada fase ini mikroalga sedang dalam kondisi pertumbuhan maksimum terlihat dari konsentrasi yang terukur sampai waktu 264 jam, bahwa kurva yang dihasilkan selalu meningkat yang menandakan bahwa nutrisi yang dibutuhkan mikroorganisme tersebut untuk tumbuh masih tersedia dalam jumlah yang cukup besar. Jika diamati lebih lanjut maka waktu 264 jam sampai dengan 360 jam, pertumbuhan sudah tidak ada penambahan konsentrasi mikroalga yang signifikan. Hal ini terlihat pada hasil pengukuran biomassa kering yang menunjukkan bahwa konsentrasinya cenderung konstan sehingga disebut fase stasioner. Terdapat empat fase pertumbuhan mikroalga menurut Castellanos (2013) yaitu fase adaptasi (lag), fase pertumbuhan eksponensial, fase stasioner, dan fase kematian. Pada penelitian ini, mikroalga yang digunakan untuk sintesa biodiesel adalah pada fase eksponensial dimana pertumbuhan mikroalga optimal sehingga data yang dibutuhkan untuk pertumbuhan mikroalga adalah 7 hari.

Transesterifikasi In Situ

Transesterifikasi in situ merupakan proses sintesa biodiesel dengan melibatkan proses ekstraksi dan transesterifikasi di dalam satu tahapan proses. Minyak yang terkandung di dalam mikroalga mula-mula diekstrak oleh pelarut metanol yang juga berfungsi sebagai reaktan. Minyak yang telah diekstrak akan bereaksi dengan metanol melalui reaksi transesterifikasi menghasilkan produk biodiesel/metil ester. Proses transesterifikasi menggunakan katalis asam H_2SO_4 berguna untuk meningkatkan laju reaksi. Berikut ini merupakan reaksi yang terjadi pada reaksi transesterifikasi (Chisti, 2007):

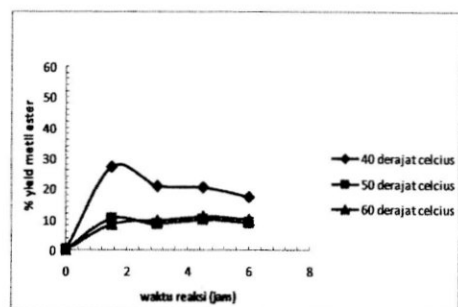


Gambar 2. Mekanisme reaksi transesterifikasi

Pada penggunaan reaktan sebesar 0,5 gram mikroalga menghasilkan yield metil ester yang berbeda – beda pada setiap variasi suhu dan konsentrasi katalis. Pada kondisi suhu reaksi 40 °C, konsentrasi katalis H₂SO₄ sebesar 2 % dan waktu reaksi 1,5 jam merupakan kondisi optimal pada pembentukan metil ester yaitu menghasilkan yield metil ester sebesar 47% (berat metil ester / berat mikroalga kering).

Pengaruh Suhu Reaksi Terhadap Yield Metil Ester

Pada reaksi transesterifikasi in situ mikroalga terdapat dua tahapan proses di dalam reaktor yaitu tahap ekstraksi dan tahap reaksi transesterifikasi (Ehimen et al., 2010). Pada tahap ekstraksi, pelarut metanol akan mengekstrak minyak yang terkandung di dalam biomassa mikroalga untuk kemudian bereaksi dengan minyak melalui reaksi transesterifikasi menghasilkan produk biodiesel/metil ester. Yield metil ester menunjukkan seberapa besar perbandingan antara berat metil ester yang dihasilkan terhadap berat biomassa kering mikroalga.

Gambar 3. Pengaruh suhu reaksi terhadap yield metil ester pada konsentrasi katalis H₂SO₄ sebesar 1%.

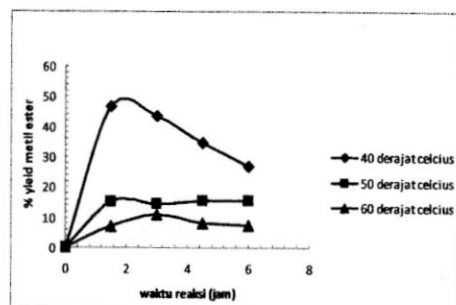
Hasil penelitian sesuai gambar 3 menunjukkan bahwa pada konsentrasi katalis sebesar 1% dan suhu reaksi 40 °C, yield metil ester meningkat dengan bertambahnya waktu reaksi sampai mencapai titik maksimum pada waktu reaksi 1,5 jam dengan yield metil ester sebesar 27% dan kemudian monoton turun sampai mencapai yield kesetimbangan. Pada suhu 50 °C dan 60 °C yield metil ester meningkat dengan bertambahnya waktu reaksi dan kemudian konstan (setimbang) dengan peningkatan waktu reaksi. Reaksi transesterifikasi in situ yang dilakukan pada suhu 40 °C menghasilkan yield metil ester yang lebih besar bila dibandingkan suhu 50 °C dan 60 °C pada

konstruksi katalis asam sebesar 1% berat. Reaksi transesterifikasi in situ menggunakan katalis asam sulfat pada suhu 50 °C dan 60 °C tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap hasil yield metil ester yang diperoleh (Gambar 3) yaitu produk akhir yield metil ester yang diperoleh sebesar 10%. Berdasarkan kinetika reaksi bahwa peningkatan suhu akan meningkatkan nilai konstanta laju reaksi sehingga laju reaksi akan meningkat

sesuai dengan persamaan Arrhenius $k = k_0 e^{\frac{-E}{RT}}$ dimana

k_0 = faktor frekuensi, E = energi aktivasi, R = konstanta gas, dan T = suhu (Levenspiel, 1972; Fogler 2006). Hasil penelitian menunjukkan terdapat perbedaan dengan teori yang dapat disebabkan faktor lain yang dominan di dalam reaksi kimia secara keseluruhan yaitu perpindahan massa dan konsentrasi reaktan metanol di dalam campuran reaksi. Pada suhu reaksi yang lebih besar akan meningkatkan penguapan metanol sebagai pelarut dan reaktan.

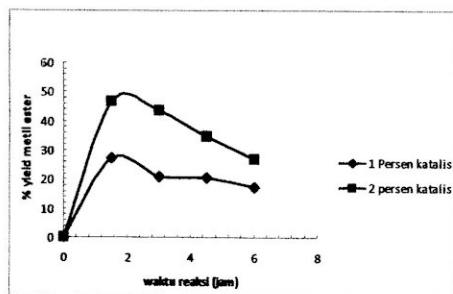
Pengurangan volume metanol menyebabkan rasio reaktan menjadi berkurang sehingga yield metil ester yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Purwanto et al. (2012) pada transesterifikasi in situ menggunakan mikroalga *Scenedesmus dimorphus*. Penelitian lain yang dilakukan oleh Jiang et al. (2012) menggunakan sodium fosfat sebagai katalis untuk pembuatan biodiesel menggunakan bahan baku minyak biji lobak dengan rentang suhu reaksi 60 sampai 80 °C juga memberikan hasil yang serupa.

Gambar 4. Pengaruh suhu reaksi terhadap yield metil ester pada konsentrasi katalis H₂SO₄ sebesar 2%.

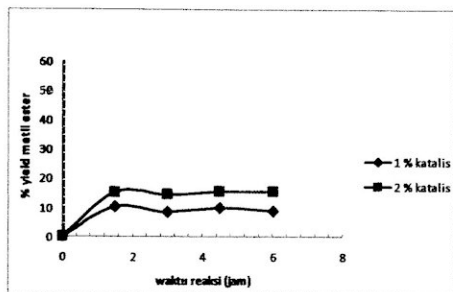
Gambar 4 menunjukkan pengaruh suhu reaksi terhadap yield metil ester dengan menggunakan 2% katalis asam sulfat. Pada suhu reaksi 40 °C menunjukkan hasil yield metil ester meningkat dengan bertambahnya waktu reaksi dan setelah mencapai yield maksimal sebesar 47% turun dengan peningkatan waktu reaksi. Profil yang mirip juga dihasilkan untuk reaksi transesterifikasi pada suhu 50 °C dan 60 °C. Transesterifikasi in situ pada waktu reaksi 1,5 jam dan suhu reaksi 40 °C menghasilkan yield metil ester tertinggi pada konsentrasi katalis 2%. Hasil ini menunjukkan kecenderungan yang sama dengan konsentrasi katalis sebesar 1% (Gambar 3) yaitu suhu reaksi semakin besar dapat menurunkan yield metil ester.

Pengaruh Konsentrasi Katalis Terhadap Yield Metil Ester

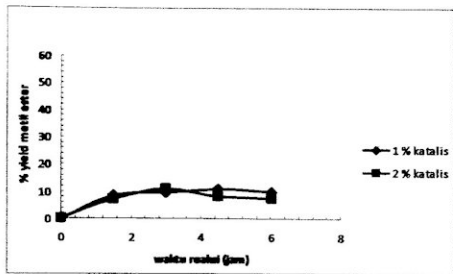
Katalis merupakan bahan yang ditambahkan untuk meningkatkan laju reaksi sehingga diperoleh hasil semakin tinggi konsentrasi katalis akan meningkatkan yield metil ester sesuai Gambar 5 dan 6 (Fogler, 2006). Pada Gambar 5 menunjukkan penurunan yield metil ester untuk waktu reaksi lebih dari 2 jam yang dapat disebabkan untuk waktu reaksi yang lebih lama terjadi degradasi produk metil ester menjadi produk yang tidak diharapkan.



Gambar 5. Pengaruh konsentrasi katalis terhadap yield metil ester pada suhu 40 °C.

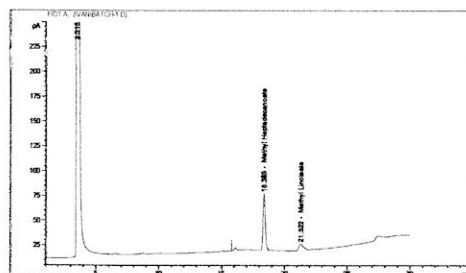


Gambar 6. Pengaruh konsentrasi katalis terhadap yield metil ester pada suhu 50 °C.



Gambar 7. Pengaruh konsentrasi katalis terhadap yield metil ester pada suhu 60 °C.

Transesterifikasi in situ pada suhu 60 °C memberikan hasil yang tidak berbeda secara signifikan terhadap yield metil ester pada konsentrasi katalis asam sebesar 1% dan 2% yaitu menghasilkan yield metil ester kurang dari 10%. Metil ester yang dihasilkan dari reaksi transesterifikasi in situ mikroalga *Chlorella vulgaris* menggunakan pertumbuhan secara autotrof adalah metil heptadekanoat dan metil linoleat (Gambar 7). Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* secara autotrof menghasilkan minyak dengan asam lemak penyusun adalah asam heptadekanoat dan asam linoleat (Gambar 8).



Gambar 8. Kromatogram produk metil ester hasil transesterifikasi in situ.

SIMPULAN

Biodiesel dapat disintesa dari mikroalga *Chlorella vulgaris* melalui reaksi transesterifikasi in situ menghasilkan biodiesel/metil ester dengan komponen penyusun adalah metil heptadekanoat dan metil linoleat. Semakin tinggi suhu reaksi menurunkan yield metil ester yang dihasilkan dari reaksi transesterifikasi in situ. Semakin tinggi konsentrasi katalis akan meningkatkan yield metil ester pada reaksi transesterifikasi suhu 40 °C dan 50 °C. Pada suhu reaksi transesterifikasi 60 °C konsentrasi katalis tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pengaruhnya terhadap yield metil ester. Kondisi optimum untuk sintesa biodiesel dari mikroalga *Chlorella vulgaris* melalui reaksi transesterifikasi in situ adalah pada suhu 40 °C, waktu reaksi 1,5 jam, dan konsentrasi katalis asam sulfat sebesar 2% menghasilkan yield metil ester sebesar 47%.

DAFTAR PUSTAKA

- Baber, TM, Graiver, D, Lira, CT & Narayan, R 2005, 'Application of catalytic ozone chemistry for improving biodiesel product performance', *Biomacromolecules*, vol. 6, pp. 1334-1344.
- Castellanos, CC 2013, 'Batch and continuous studies of *Chlorella vulgaris* in photobioreactors', *Master Thesis in Chemical and Biomolecular Engineering*, The University of Western Ontario, Canada.
- Chiu, SY, Kao CY, Tsai, MT, Ong, SC, Chen, CH & Lin, CS 2009, 'Lipid accumulation and CO₂ utilization of

- Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration', *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 2, pp. 833-838.
- Chrsti, Y 2007, 'Biodiesel from microalgae', *Journal of Biotechnology Advances*, vol. 25, pp.294-306.
- Ehimen, EA, Sun, ZF & Carrington, CG 2010, ' Variables effecting the in situ transesterification of microalgae lipids', *Fuel*, vol. 89, no. 3, pp. 677-684.
- Fogler, HS 2006, *Elements of chemical reaction engineering*, 4th edn, Prentice Hall Professional Technical Reference, Massachusetts.
- Jiang, ST, Zhang, FJ & Pan, LJ 2010, ' Sodium phosphates as a solid catalyst for biodiesel preparation', *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 137-144.
- Khan, SA, Rashmi, Hussain, MZ, Prasad, S & Banerjee, UC 2009, 'Prospect of biodiesel production from microalgae in India', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2361-2372.
- Levenspiel, O 1972, *Chemical reaction engineering*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, Toronto.
- Mata, TM, Martins, AA & Caetano, NS 2010, 'Microalgae for biodiesel production and other applications: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 217-232.
- Purwanto, E & Fransiscus, Y 2012, ' Optimasi sintesa biodiesel dari mikroalga *Scenedesmus dimorphus* melalui reaksi transesterifikasi in situ', *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Universitas Indonesia*, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Qian, J, Wang, F, liu, S & Yun, Z, 2010, ' In situ alkaline transesterification of cottonseed oil for production of biodiesel and nontoxic cottonseed meal, *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 18, pp. 9009-9012.
- Tran, DH, Yeh, KL, Chen, CL, & Chang, JS 2012, ' Enzymatiz transesterification of microalgal oil from *Chlorella vulgaris* ESP-31 for biodiesel synthesis using immobilized *Burkholderia* lipase, *Bioresource Technology*, vol. 108, pp. 119-127.